

МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ 12% ХРОМИСТОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-823

Алмаева К.В., Полехина Н.А., Литовченко И.Ю., Линник В.В.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Проведены оценки основных механизмов упрочнения 12% хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823 (Fe-12Cr-0,74Mo-0,68W-1,09Si-0,34V-0,40Nb) в структурном состоянии после традиционной термической обработки (ТТО, нагрев до $T = 1100$ °С 1 ч., отпуск при $T = 720$ °С, 3 ч.) и высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО, нагрев до $T = 1100$ °С 1 ч., горячая пластическая деформация прокаткой в аустенитной области до величины $\varepsilon \approx 50$ % с последующей закалкой в воду и отпуск при $T = 720$ °С 1 ч.).

В работе предполагается справедливость аддитивности основных механизмов упрочнения [1, 2], которые суммарно описывают вклад в значение предела текучести ($\Delta\sigma_{0,2}$) следующей формулой:

$$\Delta\sigma_{0,2} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{disp} + \Delta\sigma_{disl} + \Delta\sigma_{GB} \quad (1),$$

где σ_0 – напряжение трения решетки (силы Пайерлса-Набарро), $\Delta\sigma_{ss}$ – твердорастворное упрочнение, $\Delta\sigma_{disp}$ – дисперсное упрочнение, $\Delta\sigma_{disl}$ – дислокационное (деформационное), $\Delta\sigma_{GB}$ – зернограницное упрочнение.

Упрочнение за счет сил Пайерлса-Набарро рассчитывали по формуле:

$$\sigma_0 = 2G \cdot 10^{-4} \quad (2),$$

где $G = 86,5$ ГПа – модуль сдвига для 12% хромистой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 по составу, близкой к стали ЭП-823 [3]. Таким образом, $\sigma_0 \approx 17$ МПа.

Твердорастворное упрочнение за счет наличия легирующих элементов, согласно [1, 2] рассчитывается как:

$$\Delta\sigma_{ss} = k_i C_i \quad (3)$$

где k_i – коэффициент упрочнения i -ым легирующим элементом; C_i – концентрация, % (по массе), i -го легирующего элемента, растворенного в феррите. Поскольку основным легирующим элементом в стали ЭП-823 является хром (11,56 масс.%), а содержание других элементов значительно меньше, в настоящей работе в твердорастворном упрочнении учтен вклад только хрома. При этом предполагается, что в отпущенных состояниях (после ТТО и ВТМО) значительная часть углерода связана в карбидные частицы типа $M_{23}C_6$ (где $M = Fe, Cr$) и MX (где $M = Nb, Mo, X = C, N$), что позволяет пренебречь вкладом от этого элемента. Учитывая, что $k_i(Cr) = 31$ МПа [1, 2], вклад твердорастворного упрочнения в рассматриваемом приближении составляет 358 МПа.

В стали ЭП-823 дисперсное упрочнение реализуется за счет огибания по механизму Орована дислокациями наноразмерных (некогерентных) карбонитридов типа MX [3], которое можно рассчитать по формуле [1, 2]:

$$\Delta\sigma_{disp} = G \cdot b/\lambda \quad (4),$$

где $G = 86,5$ ГПа – модуль сдвига, b – вектор Бюргера дислокаций $\approx 0,25$ нм [3], $\lambda \approx R(2\pi/3f)^{1/2}$ – среднее расстояние между частицами (R – радиус частиц; f – их объемная доля).

Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии [4], после указанных выше обработок, дисперсные частицы типа MX имеют размеры 3-20 нм. При объемной доле указанных частиц 0,9% ($f=0,009$) и их среднем размере 5 нм после ВТМО, теоретически рассчитанное значение $\Delta\sigma_{disp} = 576$ МПа; при объемной доле 0,6% ($f=0,006$) и среднем размере частиц 10 нм после ТТО, теоретически рассчитанное значение $\Delta\sigma_{disp} = 240$ МПа.

При плотности дислокаций [5] после ВТМО $\approx 8,4 \cdot 10^{10}$ см⁻², после ТТО $\approx 7,4 \cdot 10^{10}$ см⁻², для стали ЭП-823 рассчитано дислокационное упрочнение по формуле [1, 2]:

$$\Delta\sigma_{disl} = \alpha \cdot m \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2} \quad (5),$$

где α – коэффициент, зависящий от характера распределения и взаимодействия дислокаций $\approx (0,1-0,3)$, m – ориентационный множитель $\approx 2,75$ (для ферритно-мартенситных сталей), произведение $\alpha m \approx 0,5$ [1, 2]. Таким образом, $\Delta\sigma_{disl} = 313$ МПа после ВТМО и $\Delta\sigma_{disl} =$

292 МПа после ТТО.

Зернограничное упрочнение (для высокоугловых границ) подчиняется соотношению Холла–Петча [1, 2]:

$$\sigma_{GB} = K_y d^{-1/2} \quad (6),$$

где d – размер зерна, а K_y – экспериментально полученная константа, которая для низкоуглеродистых сталей составляет $\approx 0,62 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ [1, 2]. Для малоугловых границ используется следующая формула:

$$\sigma_{GB(\text{lab})} = K_y d^{-1} \quad (7)$$

где K_y – экспериментально полученная константа $\approx 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ МПа} \cdot \text{м}$ [1, 2].

Поскольку микроструктура стали ЭП-823 состоит из пакетного мартенсита и зерен феррита, зерна феррита и мартенситные блоки являются высокоугловыми границами, в то время как мартенситные ламели – малоугловыми границами. При среднем размере мартенситных блоков и зерен феррита 3,1 мкм (после ТТО) и 2,1 мкм (после ВТМО), зернограничное упрочнение для высокоугловых границ составляет 370 МПа после ТТО, и 420 МПа после ВТМО. Средняя ширина мартенситных ламелей после ТТО – 600 нм, после ВТМО – 230 нм, исходя из этого, упрочнение малоугловыми границами после ТТО – 250 МПа и после ВТМО – 650 МПа.

Из представленных выше теоретических оценок следует, что основными механизмами упрочнения 12% хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после двух режимов обработок являются: дисперсное упрочнение наноразмерными карбонитридами типа МХ по механизму Орована; твердорастворное упрочнение хромом; зернограничное упрочнение высокоугловыми (за счет зерен феррита и блоков мартенсита) и малоугловыми (за счет мартенситных ламелей) границами; деформационное упрочнение за счет высокой плотности дислокаций. Значения вкладов дисперсного и зернограничного упрочнений после ВТМО в несколько раз превышают соответствующие значения после ТТО.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0008.

1. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. М.: Металлургия. – 1986. – 312 с.
2. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. К.: Наукова думка. – 1975. – 296 с.
3. Полехина Н.А., Алмаева К.В., Литовченко И.Ю., Тюменцев А.Н., Пинжин Ю.П., Чернов В.М., Леонтьева-Смирнова М.В. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на микроструктуру, механические свойства и разрушение малоактивируемой 12%-ной хромистой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 в интервале температуры от -196 до 700 °С // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия Термоядерный синтез. 2019. Т. 42, № 4. С. 31–38.
4. Litovchenko I.Yu., Almaeva K.V., Polekhina N.A., Akkuzin S.A., Linnik V.V., Moskvichev E.N., Chernov V.M., Leontyeva-Smirnova M.V. The Microstructure and Mechanical Properties of Ferritic-Martensitic Steel EP-823 after High-Temperature Thermomechanical Treatment // Metals. 2022. Vol. 12. P. 79.
5. Almaeva K.V., Polekhina N.A., Litovchenko I.Yu., Khimich M.A. Effect of treatment modes on the microstructure parameters of heat-resistant 12% chromium ferritic-martensitic steels EK-181 and EP-823 // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2509. P. 020013.